

D滑走路の設計の基本的考え方(その1)

～設計条件及び性能規定～

関東地方整備局 港湾空港部 東京国際空港再拡張プロジェクト推進室

宮田正史, 上原正光, 野口孝俊, 福本裕哉, 志茂 香, 竹内 泰弘

キーワード: D滑走路建設工事, 設計・施工一括発注方式, 要求水準書, 設計条件

1. はじめに

国内航空ネットワークの基幹空港である羽田空港は、増加する航空需要に対して、その空港処理能力は既に限界に達している状況にある。このため、今後とも増大が見込まれる航空需要に対応していくため、新たに4本目の滑走路(以下、「D滑走路」という)及び国際地区エプロン等を整備し、羽田空港の空港処理容量を大幅に増加(年間発着能力:28.5万回 40.7万回)させる事業が羽田再拡張事業¹⁾である(図-1.1)。

D滑走路建設工事は、東京港内及び多摩川河口域という社会的及び自然的条件の極めて厳しい状況下において、2,500mの滑走路を新設するプロジェクトであり、その設計及び建設を47ヶ月という極めて短期間で実施する世界にも例を見ない困難かつ非常に高度な技術的知見が求められるプロジェクトである。

本報告では、「D滑走路の設計の基本的考え方(その1)」として、D滑走路建設工事の契約方式(設計・施工一括発注方式)の特徴、本契約方式に対応して作成された要求水準書の概要、要求水準書に示す代表的な設計条件(土質条件、地震条件)及び耐震性能の基本的な考え方について述べる。なお、次回以降の報告において、他の設計条件や発注者側で実施した各種の技術検討の結果等について引き続き報告することとする。

2. 契約方式の特徴

(1) 工法評価選定会議の提案

D滑走路の建設工法の選定及び工事契約方式の検討については、「羽田空港再拡張事業工法評価選定会議」での検討結果を踏まえて行うこととした。

同会議では、具体的な契約手続きについて、1)建設工法については、いずれの工法(栈橋工法, 埋立・栈橋組合せ工法, 浮体工法)も、適切な設計を行うことにより建設が可能であるが、各建設工法における留意点については、基本的に今後の契約発注手続きの中で、その解決を求める、2)工費(維持管理費を含む)・工期の確実性を担保するための契約方式として、設計

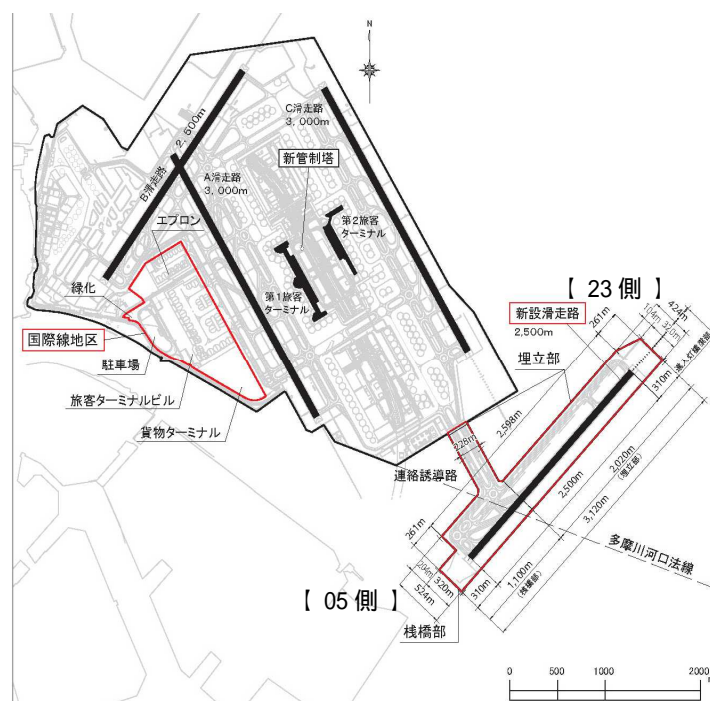


図-1.1 D滑走路建設予定位置図

段階における工費・工期を施工段階及び維持管理段階においても保証させることのできるよう、設計と施工を一体的に発注する設計・施工一括発注方式の採用が提案されている。

以上のことから、本事業では設計・施工一括発注方式を採用した(表 - 2.1)。なお、設計・施工一括発注方式の採用にともない、入札参加者が基本設計を実施して技術提案を行うとともに、契約後には請負者が実施設計及び施工を実施することから、原則として設計に起因するリスクは請負者が負担することになる。

(2) 公共事業コスト構造改革への対応

総合評価落札方式を採用し、ライフサイクルコストを考慮し、国として最も有利な提案で契約を結ぶため、総コスト(設計・施工入札価格 + 30年間の維持管理費用)の最低のものを落札者とする落札方式とした。また、あらゆる段階でのコスト縮減を可能とするため、入札前VE、落札後契約前VE及び契約後VEを導入した。

(3) 2009年末の滑走路供用の実現

大規模な空港建設工事の履行期間内での安全・確実な施工を担保するため、5工種(空港等土木工事、港湾土木工事、港湾等しゅんせつ工事、空港等舗装工事、港湾等鋼構造物工事)から構成される異工種建設工事共同企業体(構成員数8~15社)をJV構成要件(競争参加資格)として設定した。

表 - 2.1 D滑走路建設工事契約方式の主要特徴

性能発注	性能要件(要求水準書)を示し、それを満たす設計提案に基づく内容を認める発注方式 3工法での入札参加が可能
設計・施工一括発注	多様な提案を可能とすると共に、設計段階での工費を施工段階及び維持管理段階においても担保させるため、設計及び施工を一括して発注
維持管理契約特則	入札時の維持管理提案額を担保するため、請負者は、完成後30年間、国が求めた場合に、維持管理提案額に基づく維持管理業務を行う義務を負う。

3. 要求水準書の位置づけ、基本的な考え方

3.1 要求水準書の位置づけ

要求水準書は、国(発注者)が、D滑走路等の建設における設計・施工及び工事完成引渡し後の当該施設の維持管理に求める要求内容と、要求内容を確認するための国が標準と考える照査方法及び参照基準を示すものである。

また、要求水準書は、入札手続きの段階では、入札参加者が提出する技術提案(基本設計、施工計画、維持管理計画、環境影響検討)に対する技術要件であるとともに、提出された技術提案を国が審査する上での技術審査基準となる。さらに、契約後は履行期間中に実施する実施設計及び施工並びに工事完成引渡し後の維持管理業務の全般にわたって遵守すべき規定として位置づけられる。

3.2 要求水準書の基本的な考え方

(1) 性能規定

空港としての要件を満足しつつ、埋立・栈橋組合せ構造、栈橋構造、浮体構造という3つの構造形式の提案を可能とするため、従来の設計方式である仕様規定は一部の項目にとどめ、性能規定の要素を多く取り入れている。

(2) 空港に求められる重要な基本性能

要求水準書においては、空港に求められる重要な基本性能として、以下に示す性能を定めている。これらの基本性能は、D滑走路の設計、施工、維持管理、環境影響に関して最優先される事項である。なお、設計供用期間は、空港という重要な社会基盤を新しい構造形式で建設することを考慮して100年間としている。

以下に、空港としての使用性、構造物の安全性及び維持管理性に係る性能要件の具体的な内容について説明する。

空港としての使用性

要求水準書において、空港としての使用性に関する性能要件として、以下を求めている。

各施設は、航空機が通常運航可能な気象条件下において、航空機が安全かつ効率的に離発着・移動ができること、及び航空機の就航率について現空港と同等レベルが確保されることが基本的に必要である。特に基本施設である滑走路や誘導路は、航空機の操縦安全性及び乗客の乗り心地を確保すること、航空灯火施設、無線施設、その他航空機の安全な運航に必要な施設が適切に配置・設置され、かつ安定的に機能することが必要である。

構造物の安全性

要求水準書において、構造物の安全性に関する性能要件として、以下を求めている。

滑走路・誘導路をはじめとする対象施設は、設計供用期間中、提示条件で示した外力条件及びその他想定される外力に対して必要な構造安全性及び耐久性を有し、その機能を発揮することが基本的に必要である。特に、基盤施設については、その安全性が損なわれると、空港機能の抜本的な損傷につながるほか、これに伴う航空機の運航安全性ひいては社会・経済的に大きな影響を及ぼすことから、各構造部材の強度、耐久性のほか、構造物全体の安定性が確保されていることが必要である。

構造物の維持管理性

要求水準書において、構造物の維持管理性に関する性能要件として、以下を求めている。

対象施設の維持管理については、長期間にわたる施設の安全性及び使用性を確保するために、継続的に容易かつ確実に実施できることが基本的に必要である。特に、劣化・損傷が予測される材料を使用する場合には、それらの該当箇所に対する容易かつ確実なアクセスが可能であり、設計供用期間中必要かつ適切な点検・調査・維持補修(部材の交換作業も含む)が効率的かつ短期間に実施できることが示される必要がある。

表 - 3.1 空港に求められる重要な基本性能

空港としての使用性	航空機が安全に離発着でき、就航率が現空港と同程度確保されること。
構造物の安全性	滑走路、誘導路をはじめとする各空港施設及びこれらを支える基盤施設の強度及び安全性が十分に確保されていること。
工事の施工性	工期内で、安全かつ確実な品質が得られるよう施工できること。
構造物の維持管理性	構造物として100年間の設計供用期間の耐久性が確保され、維持管理が適切に行えること。
環境への影響	施工時及び供用時において、周辺環境に与える影響が少ないこと。

(3)設計・施工・維持管理の一貫性

要求水準書では、設計、施工及び維持管理の各々の内容の一貫性を求めている。すなわち、設計段階において、

- 1)設計上想定した品質・性能が施工段階で確実に確保されるような施工計画を検討し、
- 2)維持管理に係る点検・調査・維持補修等が継続的に容易かつ確実に実施できるような十分な配慮(基本構造、施設配置計画、材料・仕様及び構造細目等)、

を求めている。

従って、維持管理計画については、設計及び施工内容との一貫性を有した設計供用期間 100 年間を対象とした計画が入札段階で必要とされる。また、本工事の請負者は、完成後30年間、国が求めた場合に、入札時の維持管理計画に対応した維持管理提案額に基づく維持管理業務を行う義務を負う契約内容となっている(表 - 2.1)。

(4)実現性の確保

D滑走路建設工事は、建設予定地が多摩川及び東京港第一航路に近接し、また現羽田空港の制限表面下にあることから極めて厳しい施工条件下での工事であり、かつ履行期間も非常に短いため、要求水準書で示す設計、施工等に係る諸要件及び要求項目は、こうした厳しい条件においても、確実に実現可能であることを求めている。なお、施工実績等が乏しい技術や施工方法等については、事前の性能試験等による実現性の確認を求めている。

以上、1.～3.にわたり、埋立・栈橋組合せ構造、栈橋構造、浮体構造という3つの構造形式の提案を可能とする契約方式の特徴等について述べたが、実際に技術提案書を提出した特定建設工事共同企業体(JV)は1企業体であり、本JVが提案した構造は埋立・栈橋組合せ構造であった。

このため、埋立・栈橋組合せ構造を対象として、計画条件、地盤条件及び地震条件と耐震性能の基本的な考え方について、以下に概要を述べる。

4. 計画条件

滑走路の計画条件は、平面配置については図 - 1.1に示すとおりである。一方、滑走路の高さについては、表 - 4.1に示すとおり、入札公告時に発注者が提示した標準縦断図を基本とすることが求められるが、許容範囲内であれば設計者の判断により自由に提案・設定し、より合理的な縦断線形等を提案することが可能となっている。なお、計画条件の詳細については、要求水準書を参照されたい。

表 - 4.1 滑走路の高さに関する規定(要求水準書)

滑走路の高さ	<ul style="list-style-type: none">・滑走路標準縦断図を基本とする。・23側滑走路端の高さは、供用期間中 AP+17.1mを下回らないこと。・05側滑走路端の高さは、供用期間中 AP+15.0mを下回らないこと。・滑走路の高さは、あらゆる地点において23側滑走路端高さ以下、AP+13.0m以上とする。・勾配変化点は1箇所以内とし、その場合の勾配変化点の位置は滑走路中心部より05側とすること。
--------	---

5. 土質条件

5.1 はじめに

D 滑走路の地盤調査については、16 本の大深度ボーリングを実施し、滑走路予定地周辺の地形・地層構造及び工学的な地盤特性の把握に努めた。本報告では、発注者が本工事の入札公告に先立ち実施した地盤調査の内容及び結果の概要について述べる。

なお、以後に示す土質定数は、発注者が実施した土質調査等をもとに、発注者が工学的知見に基づき参考として設定したものであるが、今回の事業では設計・施工一括発注方式の採用にともない、設計に用いる土質条件は、設計者（請負者）が全て設定するため、実際の設計で用いられている土質定数と異なる場合があるので注意されたい。

5.2 地盤調査の概要

(1) 調査の視点及び調査概要

1) 調査の視点

D 滑走路の予定地については、地盤工学的に見た立地条件として、次のような問題が指摘されていた。

建設予定地は、多摩川の河口域にあたるので、侵食等により海底地形や埋没地形といった地形の起伏が著しい地域である。このため、海底地盤面も含め三次元的な地層構造や工学的地盤特性の連続性について把握する必要がある。

3 次元的な地層構造の連続性の把握において、埋没地形が複雑な地域では、地層の連続性が途切れたり傾斜したりしていることがあり、地層を対比する指標が必要である。このため、工学的な地盤情報のみではなく、微化石分析等の理学情報の取得が必要である。

また、水深 20m 程度の地盤に対して、最大 17m 程度の高盛土による埋立地盤の造成や各種の杭式基礎構造物（連絡誘導路橋、栈橋構造、進入灯橋梁等）を広い範囲にわたり建設する必要があること等から、次のような点に注意することが求められた。

工学的地盤特性の平面方向のばらつき程度の把握

海底面からの埋立高さは 35m を越え、500kN/m² を越える非常に大きな上載荷重が原地盤に作用することから、洪積層を含めた粘土層の圧密沈下特性や 2 次圧密特性の詳細把握。

埋立護岸部については、急速施工のため、外周護岸の基礎部分に位置する粘土層のせん断強度分布及びせん断強度の増加特性の詳細把握

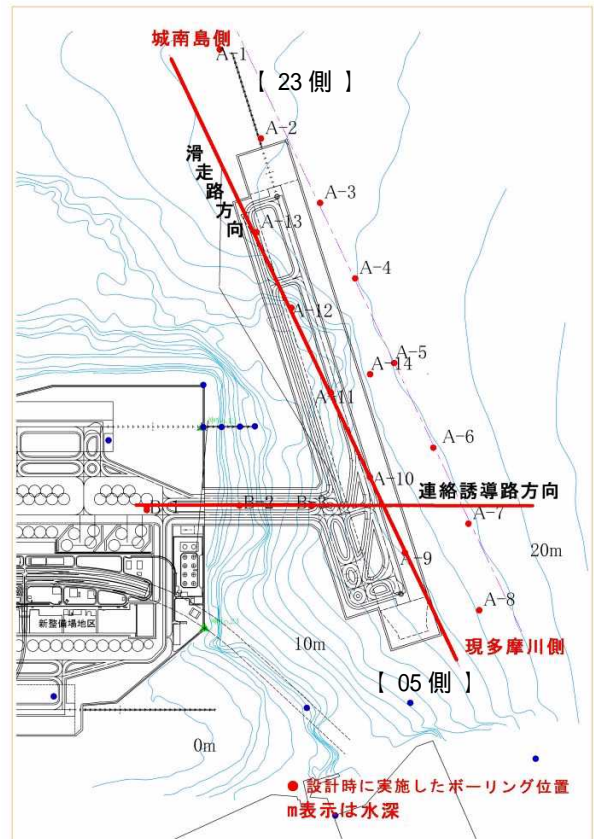


図 - 5.1 ボーリング位置図

荷重レベルの異なる杭式基礎構造物を広い範囲にわたり建設するため、荷重レベルに応じて確実に支持できる支持層の分布特性の詳細把握。

工学的基盤層が比較的深いことから、せん断波速度の深度分布の詳細把握

2) 土質調査の概要

調査の視点に記載した着目点に対し、図 - 5.1 に示す位置(調査間隔 500m 程度)において 16 本の大深度のボーリング(A-3・A-6:調査深度=約 G.L.-205m, 上記以外:調査深度=G.L.-80 ~ 100m 程度)を実施し、さらに表 - 5.1 に示すような試験を実施した。また海底地形を把握するための深浅測量やボーリング間の層序構成を把握するための音波探査を実施した。

表 - 5.1 主な試験項目

物理特性	力学特性	現位置 試験	地層対比の ための調査
土粒子の密度試験 含水比試験 コンシステンシー 粒度試験 湿潤密度試験	一軸圧縮試験 簡易 Cu 試験 三軸 UU 試験 三軸 CUN Bar 三軸 CD 試験 K ₀ 圧密試験 標準圧密試験 定ひずみ圧密 長期圧密試験 中空ねじりせん断 液状化強度試験	孔内水平載荷 間隙水圧試験 PS 検層 密度検層 孔径検層	花粉分析 定性鉱物分析 鉱物屈折率測定 (火山灰対比) AMS 年代測定 古地磁気測定 ナンノプランクトン

5.2 地形・地質構造の概要

図 - 5.2 に D 滑走路島の地層断面図(山側滑走路縦断方向)の断面図、図 - 5.3 に、既設空港島 ~ 連絡誘導路の地層断面図を示す。これらの地層断面図中に示す各地層区分名は、大磯丘陵での標準層序(南関東の標準層序)と東京地域で使用されている地層区分を対比して設定したものである^{2), 3)}。なお、従来から東京国際空港(羽田空港)では、設計の観点から工学的な判断に基づいて、AP-35m 付近まで堆積する軟弱層を A 層、AP-35m よりも深い層を D 層とし、さらに A 層、D 層それぞれの地層を構成する地層毎に連続した番号を付け整理を行っている⁴⁾。表 - 5.2 に東京港地区における従来の研究成果と D 滑走路で確認された地層の関連性を示す。

建設予定地周辺の AP-100m 以浅の地層から、当該地層は、有楽町層、七号地層、新时期段丘堆積層、東京層、江戸川層及び上総層群から構成されており、各層の特徴は表 - 5.3 に示すとおりである。

海底面(有楽町層の上面)については、現在空港側から D 滑走路側に水平かつ連続的に分布しており、有楽町層を海底面とする範囲では、水深 20m 程度の水深となっている。但し、現空港側から絡誘導路橋及び滑走路建設予定地の中央部分に向かって、有楽町層の上部に覆砂等が堆積しており、その範囲においては、水深が 12 ~ 20m 程度(深浅測量結果)となっている。覆砂層は、現空港から沖側に離れるにしたがい徐々に薄くなっている。

5.3 工学的な地盤特性

(1) 地盤全体の特性

図 5.4～図 5.8に物理特性、力学特性等の調査結果を示す。また、表 5.4及び表 5.5に工学的な地盤特性の観点から整理した各地層の特徴を示す。

工学的な観点から地盤特性を概観すると、今回の建設予定地の地盤は、水平方向の地盤物性のばらつきは比較的小さく、比較的均質な地盤であると判断できる。設計の観点から、深度方向の地層区分を大きく分類すると、表 5.4に示す ①～⑤の5層に分類することができる。以下、各層の特徴について述べる。

【 ①層】

海底面～A.P.-35m 程度に分布する地層であり、軟弱な粘性土主体の地盤である。含水比は 100%以上程度、塑性指数は 60%以上程度、間隙比は 3 以上程度である。

【 ②層】

A.P.-35m～-60m 程度に分布する地層であり、粘性土主体であるが、②層の下半分に一部砂質土が挟在する。上部の粘土層については、②層に比較すると粗粒で低塑性であり、含水比は 25～60%程度、塑性指数は 10～40%程度、間隙比は 1.3 程度である。

【 ③層】

A.P.-50m～-75m 程度に分布する地層であり、砂礫・粘性土・砂質土の互層地盤である。N値 50 以上の箇所もあり、小規模構造物の支持層となりうる層である。

【 ④層】

A.P.-70m～-95m 程度に分布する地層であり、一部小さな N 値を有する粘土が挟在しているが、N 値 50 以上の連続した層が存在し、中規模～大規模構造物の支持層となりうる層である。

【 ⑤層】

A.P.-80m 程度以深に分布する地層であり、N 値 50 以上の連続した層が存在し、大規模構造物の支持層となりうる層である。せん断波速度は、概ね 400m/s 以上である。

(2) 圧密特性

図 5.5に標準圧密試験で得られた圧密降伏応力(p_c)と現在の有効土被応力 $\sigma'_{vo} (= \Sigma \gamma' h)$ の関係、及び過圧密比(OCR)と現在の有効土被応力の関係を示す。図より、圧密降伏応力は有効上載圧の増加に伴い大きくなること、OCRは全層にわたり概ね 1.3 以上であり、②層は比較的ばらつきが小さく、③層以深はばらつきが大きい傾向にあることがわかる。図に示すとおり、OCR一定として、②層の OCR=1.3、③層の OCR=2.5と設定した。

図 5.6に圧縮指数と深度の関係を示す。②層の圧縮指数は 1.0～2.0 程度であり、正規圧密時の圧縮性が非常に大きいことが分かる。③層以深の圧縮指数は、一部の層を除き、概ね 0.2～1.0 程度であり、圧縮性は地盤が深くなるにつれて若干大きくなる傾向にある。

図 5.5に②層及び③層の体積圧縮係数 m_v と平均圧密応力の関係、及び圧密係数 c_v の関係を示す。沈下量に關係する体積圧縮係数については、正規圧密領域では大きなばらつきはない。圧密速度に關係する

圧密係数は、層については概ね $50 \sim 400 \text{cm}^2/\text{day}$ 程度である、層の圧密係数は、大きくばらつき、概ね $100 \sim 2000 \text{cm}^2/\text{day}$ 程度である。

図 - 5.7 に長期圧密試験結果による二次圧縮指数 C の深度分布を示す。試験結果データが少ないことなどから、設計用の二次圧縮指数は、試験データのやや安全側として下式を設定した。

$$C = 0.04 C_c$$

(3) せん断強度特性

図 - 5.6 に、一軸圧縮試験から得られたせん断強度 ($q_u/2$)、三軸 UU 試験から得られたせん断強度 (c_{uu}) 及び簡易 CU 試験から得られたせん断強度 (c_{su}) と深度の関係を示す。同図中に、強度増加率 ($m = (q_u/2)/p_c$) と深度の関係も示す。

強度増加率については、層の強度増加特性が埋立護岸の施工中の安定性に大きな影響を及ぼすことから、下限値に近い 0.3 を設定した。層については、平均値 0.2 と設定した。

設計用の粘着力は、圧密降伏応力 $p_c = \text{OCR} \times \sigma'_{vo}$ ($p_c = \text{OCR} \times \Sigma \gamma' h$) と強度増加率 m 用いて、粘着力を $c = m \times p_c$ として設定した。なお、図に示すとおり、設計用の粘着力は、層 ~ 層上部に関しては一軸圧縮試験結果、層下部 ~ 層に関しては簡易 CU 試験結果に適合するよう配慮した。

以上、D 滑走路建設予定地周辺の地形・地質特性及び工学的な地盤特性について述べたが、これらの情報は入札公告時に提示した土質調査参考資料において提示している。土質調査参考資料においては、広域地盤の各地点における基本設計を可能とするように離散的なボーリングデータの結果等から層 ~ 層の地盤物性値について 3次元補間を行ったものを提示している。これらの手法については、他の文献⁵⁾を参照されたい。

6. 地震条件と耐震性能の基本的な考え方

6.1 はじめに

D 滑走路は、水深 20m 程度、工学的基盤面までの深さが 60m 程度にもおよぶ海底地盤上に、埋立護岸や栈橋など、形式の異なる構造物が複合されて構築される。既往の空港施設に比較すると、今回整備する構造物は、著しく大規模で複雑な構造物である。

「空港土木施設の耐震設計指針(案)」(平成 12 年 運輸省航空局、以下「空港耐震指針」と略記)では、工学的基盤におけるレベル1地震動およびレベル2地震動について標準的な波形(既往の強震観測波形)を用いた入力地震動の経験的方法を規定している。さらに、空港耐震指針では、当該施設のように、過去に類例が少ない大規模で複雑、かつ、重要度のきわめて高い構造物に対しては、可能な限り実態に即した地震動の設定も可能である。このため、本事業の地震条件は、経験的方法による地震動の設定に加えて、空港耐震指針に示す半経験的方法として、当該地点で観測された記録を基に、考えられる最大の地震である関東地震(1923, M7.9)を再現するシナリオ地震動をレベル2地震動として設定することとした。本章では、シナリオ地震も含め地震条件の設定方法、設定結果及び耐震性能の基本的考え方について述べる。

6.2 入力地震動の設定方法

(1) 経験的な方法

空港耐震指針ではレベル1地震動およびレベル2地震動を表 - 6.1 のように規定している。また、動的解析に用いる設計入力地震動については、標準波形(八戸波、大船渡波、ポトアイランド波)の最大加速度振幅を調整して入力する経験的方法を示している。最大加速度振幅は、以下に示す距離減衰式を用いて設定してもよいとされている。なお、下記に示す距離減衰式は、地震計が SMAC 型強震計と ERS 型強震計の2種類の特性を区別するため、 A_{SMAC} 、 A_{COR} を使い分けている。

$$\log_{10}A_{COR} = 0.55M - \log_{10}(X + 0.0050 \cdot 10^{0.55M}) - 0.00122X + 0.502$$

$$\log_{10}A_{SMAC} = 0.53M - \log_{10}(X + 0.0062 \cdot 10^{0.53M}) - 0.00169X + 0.524$$

A_{COR} : 補正波最大基盤加速度(Gal)

A_{SMAC} : SMAC 型強震計の最大基盤加速度(Gal)

M : マグニチュード, X : 断層面距離(m)

表 - 6.1 空港耐震指針における入力地震動

地震動レベル	地震動レベルの説明
レベル1地震動	空港土木施設全体の設計供用期間中に1~2度発生する確率を有する地震動で、再現期間は概ね75年とする。
レベル2地震動	空港土木施設全体の設計供用期間中に発生する確率は低いが、大きな強度を有する地震動で、プレート内あるいは陸地近傍のプレート境界で発生する、いわゆる再現期間が数100年以上の地震動。なお、地域防災計画で定められた想定地震がある場合にはこれを参考として設定する。

レベル1地震動は既往地震データより最大加速度に関する期待値分析を行い、75年期待値を設定する。図 - 6.1 は全国の75年期待値分析結果を50Gal単位で領域区分したものである。レベル2地震動は、地域防災計画等の想定地震断層モデルから最大加速度を求める。また、想定地震の断層面距離XとマグニチュードMとを図 - 6.2 の要領で判定図にプロットし、AかBを判定する。Aであれば直下型として扱い、波形はポトア

イランド波, B であれば八戸波, 大船渡波を用いる。

(2) 半経験的方法

シナリオ地震動の設定は空港耐震指針に示される半経験的方法のうち, 経験的グリーン関数法を用いた。これは, 既設空港島において実施されている強震観測網で, 想定震源域近傍の小地震記録が観測されていたためである。経験的グリーン関数法は, 小地震による波形をグリーン関数(震源における微小領域の破壊による伝播経路特性と地点増幅特性の応答)とみなし, その波形を断層破壊過程に従って重ね合わせることでより大地震による地震動を合成する方法である。(図 - 6.3, 6-4 参照)

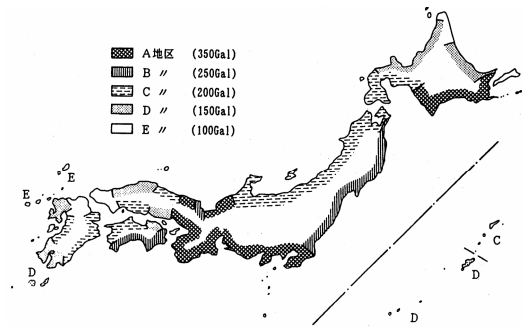


図 - 6.1 レベル1地震動 (A_{SMAC} の地域区分)

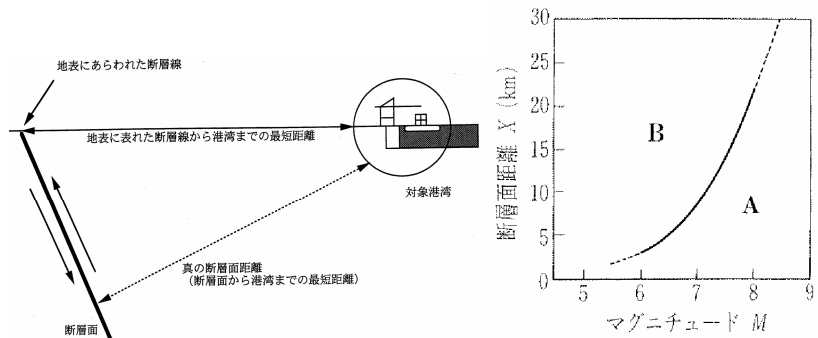


図 - 6.2 レベル2地震動の直下型判定

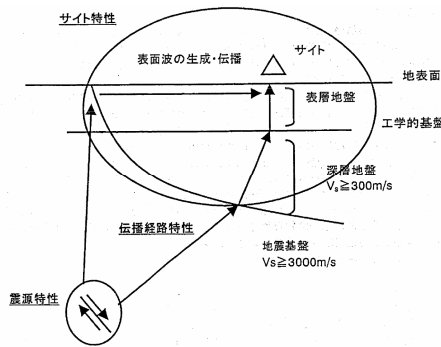


図 - 6.3 震源特性, 伝播経路特性, サイト特性

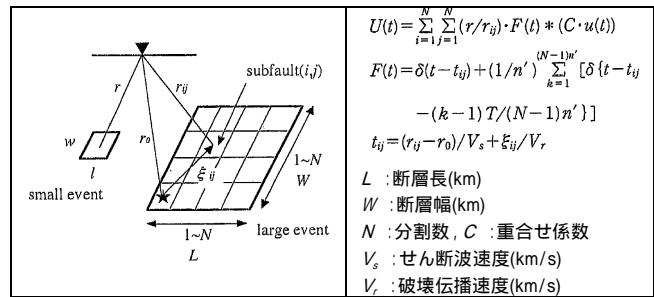


図 - 6.4 経験的グリーン関数法

5.3 設定結果

(1) 経験的な方法

レベル1地震動は, 図 - 5.1 に示される $A_{SMAC} = 350$ (Gal), 補正波に換算して得られる $A_{COR} = 439$ (Gal) の条件で, 八戸波, 大船渡波を用いるものとした。

レベル2地震動は, 表 - 5.2 に示す当該地で想定される地震の距離減衰式から求めた A_{COR} , A_{SMAC} より, 1923 年の関東地震(M7.9)の再来が最も影響が大きいと判断されたため, $A_{SMAC} = 390$ (Gal), $A_{COR} = 486$ (Gal) とした。地震波形については, マグニチュード M と断層面距離 X から図 - 5.2 により直下型ではないと判定さ

れたため、八戸波、大船渡波を用いるものとした。なお、 A_{SMAC} による入力地震動は、埋立地盤の液状化判定の際にのみ適用する。

表 - 5.2 距離減衰式による最大加速度

番号	地震名または想定断層	発生年月日	マグニチュード	実効距離 (km)	A_{SMAC} (Gal)	COR (Gal)	備考
1	関東地震	1923年 9月 1日	7.9	24.5	390	486	
2	神奈川県境直下の地震	-	7.2	21.0	327	410	東京都地域防災計画
3	区部直下の地震	-	7.2	22.0	321	403	東京都地域防災計画
4	埼玉県境直下の地震	-	7.2	30.6	273	349	東京都地域防災計画
5	東京湾北部	1894年 6月 20日	7.0	25.4	271	344	
6	関東地震(余震)	1923年 9月 1日	7.0	25.4	271	344	
7	立川断層	-	7.1	32.3	250	322	
8	多摩直下の地震	-	7.2	39.4	235	305	東京都地域防災計画

(2) 既設空港島におけるサイト特性

既設空港 (C 滑走路) におけるサイト特性の特徴について述べる。図 - 5.5 に、C 滑走路の強震観測記録 (全 31 観測規則) から算定したサイト特性 (黒太線) とその他港湾地域強震観測や K-NET など関東地方の計 122 地点のサイト特性 (細線) を示す⁶⁾。この図より、羽田空港周辺では、周波数 0.3~1.0Hz (周期 1~3 秒程度) の比較的周期が長い周期帯においてサイト特性 (増幅) が大きいことがわかる。この周波数帯におけるサイト特性は、関東地方の他のどの観測地点に比較しても大きいことから、羽田空港周辺のサイト特性の特徴であると言える。

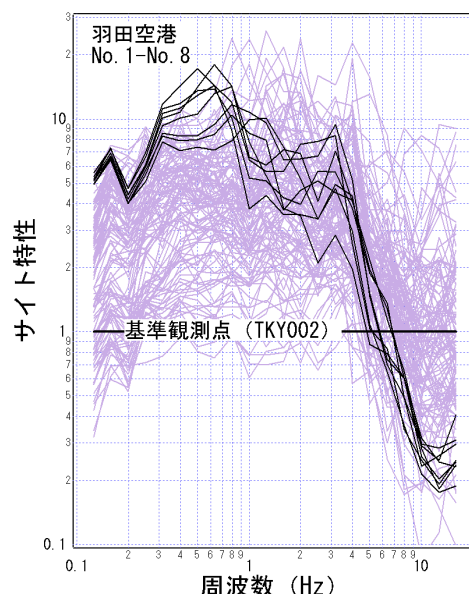


図 - 6.5 サイト特性⁶⁾
(黒線: 羽田空港、細線: その他)

(3) 経験的グリーン関数法によるシナリオ地震動の設定

要素地震については、長周期成分を優勢に含み、羽田地点の固有周期 (1~3 秒) や対象構造物の固有周期 (1~4 秒) が卓越する地震であること、また、断層タイプが関東地震 (逆断層型) と調和する地震の記録であることに配慮し、1996 年に山梨県東部で発生した地震 (M5.3) を要素地震として選定した。さらに、1 次元地震応答解析で平均的な応答を示すボ-リング位置 (No.1) の観測記録を断層面上で与える要素地震波形として適用した (図 - 6.6)。断層面上のすべり量分布は Wald and Somerville (1995) による 1923 年関東地震モデル (M7.9) に基づき

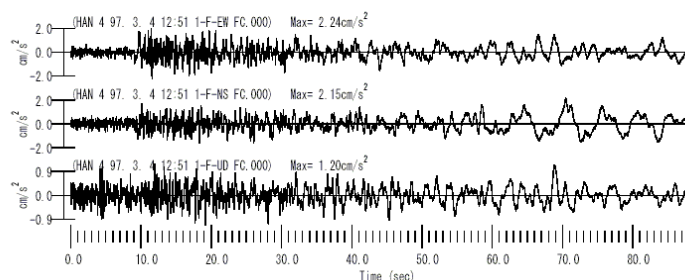


図 - 6.6 要素地震に適用した観測記録

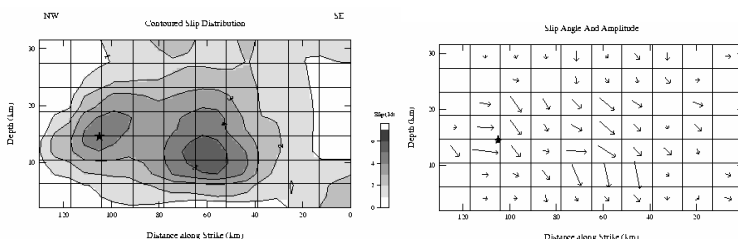


図 - 6.7 Wald and Somerville (1995) によるすべり量分布

設定した(図 - 6.7, 図 - 6.8)。なお, 断層パラメータについては, 別途詳細に報告する。

図 - 6.9に経験的グリーン関数法により設定されたレベル2地震動(シナリオ地震)の時刻歴加速度波形を示す。最大加速度は, EW 成分: 487Gal, NS 成分: 463Gal, UD 成分: 322Gal であり, 最大加速度という観点で兵庫県南部地震の観測結果と比較すると, 大きな加速度レベルではないが, 継続時間が非常に長い(約 100 秒程度)ことに特徴がある。

図 - 6.10にレベル2地震動として, 最大加速度振

幅を調整した八戸波, 大船渡波および滑走路方向に合成したシナリオ波形を示す。振幅についてはどの波形も同程度であるが, 八戸波において主要動後に長周期成分がのっており, 大船渡波の高周波成分が多い波形と異なる特徴を有している。また, シナリオ地震においては 40 秒以降に長周期成分が卓越する特徴を有している。継続時間においては, 八戸波や大船渡波と比較して, シナリオ地震波の継続時間が際だって長いことがわかる。

図 - 6.11にフーリエスペクトル, 図 - 6.12に加速度応答スペクトルを示す。図 - 6.12において, 周期 0.2 秒以下の短周期側では, 大船渡波による応答加速度が他地震に比較して大きくなるが, それ以降の長周期側においては, シナリオ波については全般的に八戸波に比べて大きなスペクトル特性を有しており, とりわけ 1 秒以上の長周期領域での加速度応答スペクトル特性において顕著である。また, シナリオ波については, 周期 1.5 秒程度においてピークを有しているが, 前述した羽田のサイト特性と整合的な結果となっている。

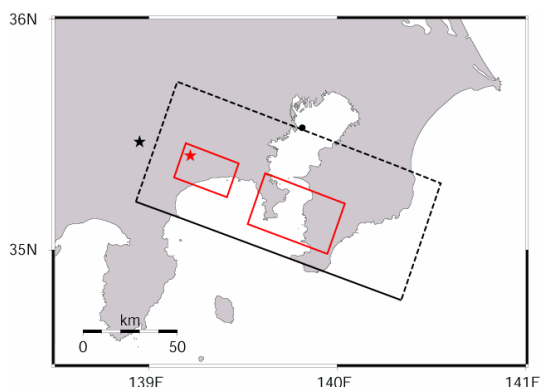


図 - 6.8 断層モデル図
(要素地震、破壊開始点)

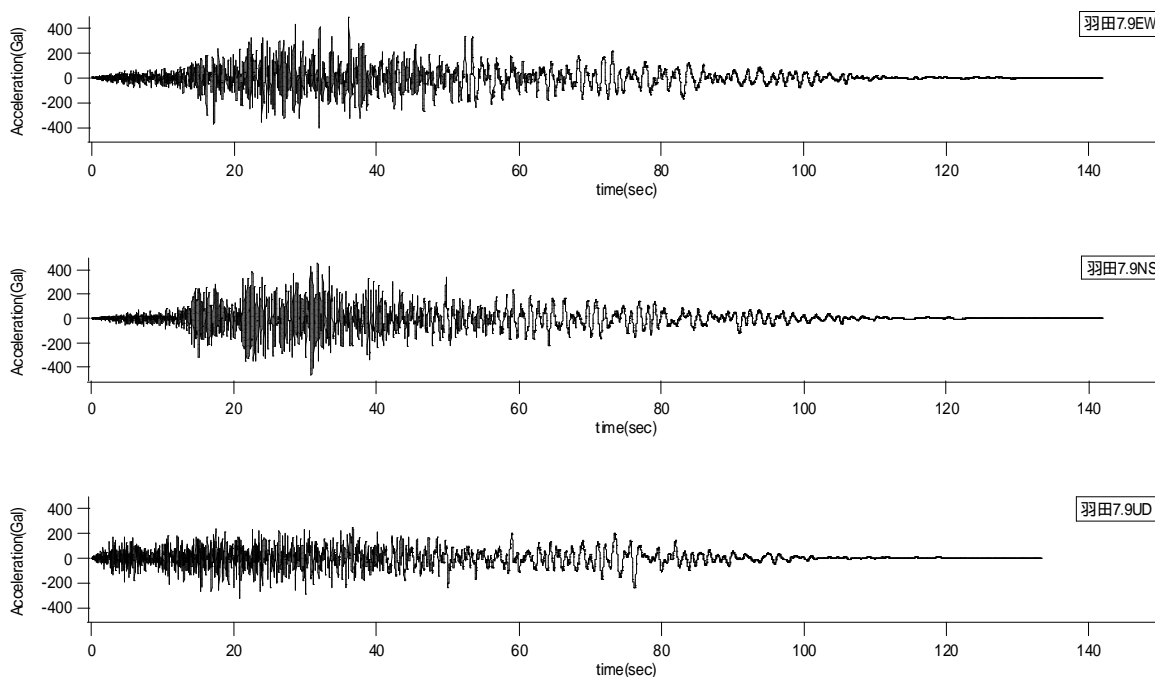


図 - 6.9 合成された時刻歴加速度波形

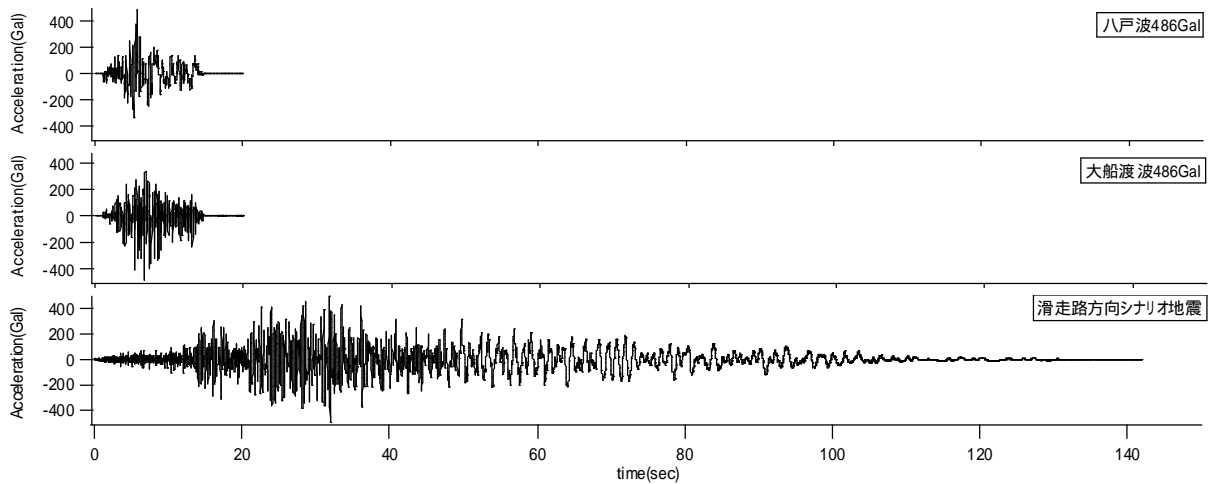


図 - 6.10 入力地震動波形 (レベル2地震動)

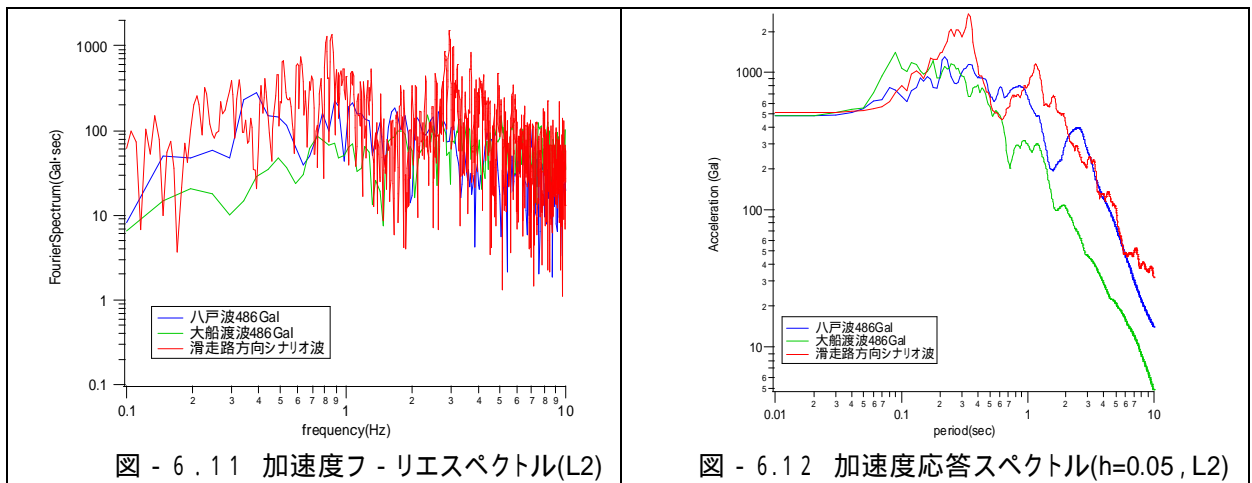


図 - 6.11 加速度フーリエスペクトル(L2)

図 - 6.12 加速度応答スペクトル(h=0.05, L2)

6.4 地震条件と耐震性能の基本的な考え方

(1) 地震条件

表 - 6.3 に地震条件の一覧を示す。地震条件の特徴を以下に述べる。なお、旧型の SMAC 型強震計の計器特性を考慮して設定した入力加速度波形 (A_{SMAC} に相当) については、埋立地盤の液状化判定の際に使用するためであるため、表中には動的解析の入力波形として使用する補正基盤加速度波形 (A_{COR} に相当) のみを記載している。

表 - 6.3 中に示すとおり、レベル1地震動については、他の基準類と比較すると、最大加速度 (439Gal) はやや大きめの設定になっている。なお、八戸波及び大船渡波については、現空港施設の耐震設計において適用される地震条件 (レベル1, レベル2) と同一である。

表 - 6.3 入力地震動の条件一覧

地震動	提示条件
レベル1 地震動	大船渡波 : 補正最大基盤加速度 439gal
	八戸波 : 補正最大基盤加速度 439gal
レベル2 地震動	大船渡波 : 補正最大基盤加速度 486gal
	八戸波 : 補正最大基盤加速度 486gal
	シナリオ地震 (想定南関東地震) ・羽田 7.9EW (最大基盤加速度 487 gal) (EW 成分) ・羽田 7.9NS (最大基盤加速度 463 gal) (NS 成分)

レベル2地震動については、最大加速度で比較すると、八戸波・大船渡波のレベル1及びレベル2地震動の最大加速度より若干大きい加速度になっているが、シナリオ地震は前述したとおり継続時間が非常に長く（120秒程度）、長周期成分が卓越する非常にエネルギーの大きい地震動である。このため、レベル2地震動として、八戸波・大船渡波・シナリオ地震の3種類の地震波形を提示しているが、動的解析による地震時変形照査はシナリオ地震が最も厳しい入力条件であると考えられる。

(2)耐震性能の基本的な考え方

最後に、要求水準書における耐震性能の基本的な考え方を表-6.4に示す。レベル1地震動については、軽微な被害程度とし、地震後速やかに空港再開を可能とする

ための構造安定性を要求している。レベル2地震動については、一定の被害は許容するが、例えば落橋等の構造物の崩壊を発生させないことを要求しており、復旧が可能なレベルの被害を想定している。

表-6.4 地震動レベルと耐震性能の基本的考え方

地震動	要求内容
レベル1地震動	構造物としては軽微な被害程度とし、強度、安定性を確保すること。
レベル2地震動	構造物としては著しい被害を受けるが崩壊しないこと。

7. おわりに

羽田空港再拡張事業は、国民の期待が非常に高い事業であることから、本事業を一日も早く完成させ、我が国の経済や国際競争力の向上に寄与できるよう、関係者とともに最大限努力していきたいと考えている。

なお、本報告で紹介した要求水準書の作成及び設計条件の設定等に係る技術的検討事項については、国土技術政策総合研究所及び港湾空港技術研究所の多大な支援・協力を頂いた。末筆ではあるが、ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局ホームページ(http://www.mlit.go.jp/koku/04_outline/01_kuko/02_haneda)
- 2) 岡重文, 菊地隆男, 桂島茂(1984): 東京西南部地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所.
- 3) 東京都港湾局(2001): 「新版 東京港地盤図」.
- 4) 田中洋行, 北詰昌樹, 土田孝(2002): 羽田空港沖合い展開事業に係る地盤工学的課題, 土木学会論文集, No.722/-61, PP1-12.
- 5) M. Tanaka, Y. Watabe, M. Miyata, and S. Sakajo: 3D-Visualization of Ground of New Runway at Haneda Airport, **Soils and Foundations**, Japanese Geotech. Soc.. (印刷中)
- 6) 野津厚, 佐藤陽子, 菅野高弘: 羽田空港の地震動特性に関する研究(第2報)スペクトルインバージョンによるサイト特性, 港湾空港研究所報告, 第42巻, 第2号, 2003年6月.

表 - 5.2 東京港の地層との対比

地質時代	年代 ×10 ⁴	首都圏 (総称名)	東京地域※ ^{1,2)} (水成層)	東京港※ ^{1,3)}	D滑走路
第四紀	完新世	1	有楽町層 (C)	埋立土層 (C, S, G, 礫) H	H
				最上部沖積層 (S, C)	Yuc(Ac1) Ys1(As1) Ylc(Ac2) Ys2(As2)
	後期更新世	2	七号地層 (CS/G)	有楽町層 上部(S) Yu	Nac1(Dc1), Nas1(Ds1)
				有楽町層 下部(C) Yl	Nac2(Dc2), Nas2(Ds2)
	中期更新世	14	下 総層群	七号地層 上部(S) Nu	埋没ローム (C) BL-1
				七号地層 下部(SC) Nl	埋没段丘礫層 (SG) BTg-1
	前更新世	50 70	上総層群	立川礫層 (G)	上部粘土層 BL-2
				中台礫層 (G)	上部層(S) Tsu
	前更新世	160	上総層群	武蔵野礫層 (G)	中部層(S) Tcm
				成増礫層 (G)	下部層(C) Tc1
			東京層上部層 (S~SC)	東京層 T	Toc1(Dc3)・Tos1(Ds3) Tog1(Dg2)
			東京層下部層 (高砂層?)(GS)	江戸川層 (SC~SG)	Toc2(Dc4), Tog2(Dg3), Tos2(Ds4)
			江戸川層 舍人層 (SC~SG)	東久留米層 (CS)	Toc3(Dc5), Tos3(Ds5) Tog3(Dg4)
			東久留米層 (CS)	東京礫層 (G) Tg	Eds1(Ds6), Edc1(Dc6)
			上総層群	第1砂層(S) Eds 1 第1礫層(G) Edg 1 第2砂層(S) Eds 2 第2礫層(G) Edg 2 第3砂層(S) Eds 3 第3礫層(G) Edg 3	
			上総層群	(C) 泥岩 Km (S) 砂岩 Ks 凝灰質砂岩 Kp	Ks, Km (断面図より下位で確認している)

C: 粘性土, S: 砂質土, G: 砂礫(各地層の主な層相を示す。) 著者(1988)¹⁾; 東京都港湾局(1993)³⁾を対比

表 - 5.3 各地層の特徴

地質時代	年代 ×10 ⁴	首都圏 (総称名)	D滑走路	地層の特徴	
第四紀	完新世	1	H	最上部を構成する地層で非常に軟弱である。基底はほぼ水平で最下部に薄く砂層を挟む。AP-35m付近に境界がある	
			Yuc(Ac1) Ys1(As1) Ylc(Ac2) Ys2(As2)	Yuc層と比べるとやや硬い。基底は年代測定及び火山灰対比で確定している。	
	後期更新世	2	七号地層	Nac1(Dc1), Nas1(Ds1) Nac2(Dc2), Nas2(Ds2)	いくつかの谷埋め堆積物に区分できる。砂と粘土の互層であり、埋没段丘礫層を削り込みやや多摩川側に傾斜している。
			新期堆積丘	btg(Dg1)	D滑走路空港島の北半部にのみ確認される。大きな礫を含む立川相当の埋没段丘である。
	中期更新世	14	下 総層群	Toc1(Dc3)・Tos1(Ds3) Tog1(Dg2)	珪藻の遺骸がブロック上に含まれ高含水比の部分が局部的に出現する。基底部には薄く礫を挟むが、基底地形は掘り込まれることもなく水平である。火山灰により大磯丘陵の吉沢層中部(東京地域の東京層約9~11万年前)に対比される。
				Toc2(Dc4), Tog2(Dg3), Tos2(Ds4) Toc3(Dc5), Tos3(Ds5) Tog3(Dg4)	基底は砂礫層(東京礫層)の侵食により複雑な埋没地形となっている。Tog2は砂礫層の上下で確認されている火山灰層と花粉分析から約14万年前~約20万年間に堆積したと考えられる。Tog3については層位からTog2よりやや古い時代に堆積したと考えている。粘性土は低含水比。
	前更新世	50 70	上総層群	Eds1(Ds6), Edc1(Dc6)	大磯丘陵の早田層(東京港地区の江戸川層)以深に対比される約20万年前より古い時代の地層である。工学的には確実な支持基盤となるが地層上面の形状は東京礫層の侵食により複雑で、所により残丘として出現する。北西方向にゆるく傾斜している。全体的には砂質土で構成されており、薄い粘土層や砂礫層を挟む。TB10やTcu1といった火山灰層を多く挟む。
				上総層群	Ks, Km (断面図より下位で確認している)
	前更新世	160	上総層群	Ks, Km (断面図より下位で確認している)	

表 - 5.4 工学的地層区分(小区分)

大区分	小区分		土質	特徴
	- H	覆土部	粘性土主体で、一部砂質土を挟在。	* 粘性土を主体とし砂を挟む覆土。最上部層。
	1 ~ 2	Ac1 (AP - 20 ~ 30m)	粘性土主体。	* 高含水比高塑性指数・間隙比が大きい($w_h > 100, I_p > 60, e > 3$)。
	3	Ac1 (AP - 30m ~)		* 圧密特性により 5m 間隔で区分。 * 単位体積重量は $\gamma_t = 13.5\text{kN/m}^3$ 程度。 * 単位体積重量は $\gamma_t = 15.0\text{kN/m}^3$ 程度。
	1 ~ 4	Ac2 ~ Dc1 層	粘性土主体で、層の下半分に一部砂質土挟在。	* 層と比べると粗粒で低塑性な粘性土。 * 圧密特性により 5m 間隔で区分。 * 単位体積重量は $\gamma_t = 18.0\text{kN/m}^3$ 程度と粘性土としては大。
	S	Ac2 ~ Dc1 層一部の砂質土部		* 層の下半分に位置する砂質土で、厚さは薄く互層状態。
	1 ~ 3 2 低 Cc	互層の粘性土部	粘性土と砂質土、砂礫の互層。	* 単位体積重量は $\gamma_t = 18.0\text{kN/m}^3$ 程度と粘性土としては大。
	S	互層の砂質土部		* 1 は高 Cc の層の上、3 は高 Cc の下に位置。 * 低 Cc 箇所は高 Cc と同じ深度。 * N 値 50 以上が比較的連続する砂質土。
	2 高 Cc	粘性土の高含水比部		* 単位体積重量は $\gamma_t = 14.5\text{kN/m}^3$ 程度と粘性土としては小。 * 珪藻を多量に含み高塑性・一部高含水比で間隙比が大。 * AP - 70m 付近に出現。
	G	互層の砂礫部		* 層中に挟まれる段丘礫層 (btg 層)。 * 礫径が 100mm 超。
	C	工学基盤と見なせる可能性のある層 (粘性土部)	砂質土と砂礫が主体で、一部粘性土挟在。	* 粘性土の塑性指数は、比較的低いが $I_p = 10 \sim 40$ と幅を持つ。
	S	工学基盤と見なせる可能性のある層 (砂質土部)		* 砂質土を主体とする層。 * N 値は 50 以上あるが一部 N 値が低下。
	G	工学基盤と見なせる可能性のある層 (砂礫部)		* 礫径 80mm 程度。 * N 値は 50 以上。
		工学基盤層	砂質土主体。	* おおむね砂質土で構成、粘性土の層厚は、薄い。 * N 値が 50 以上の連続した層。

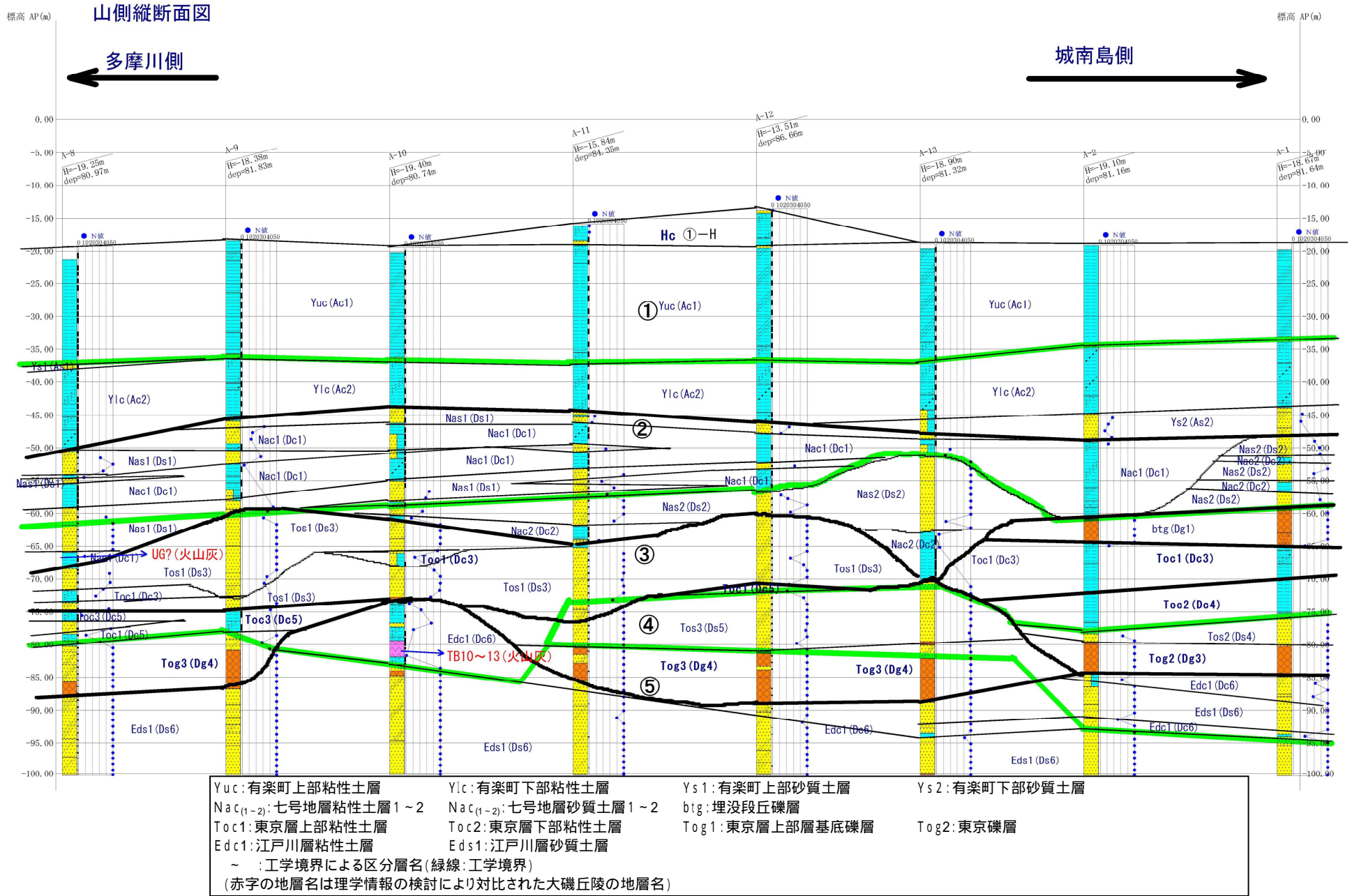
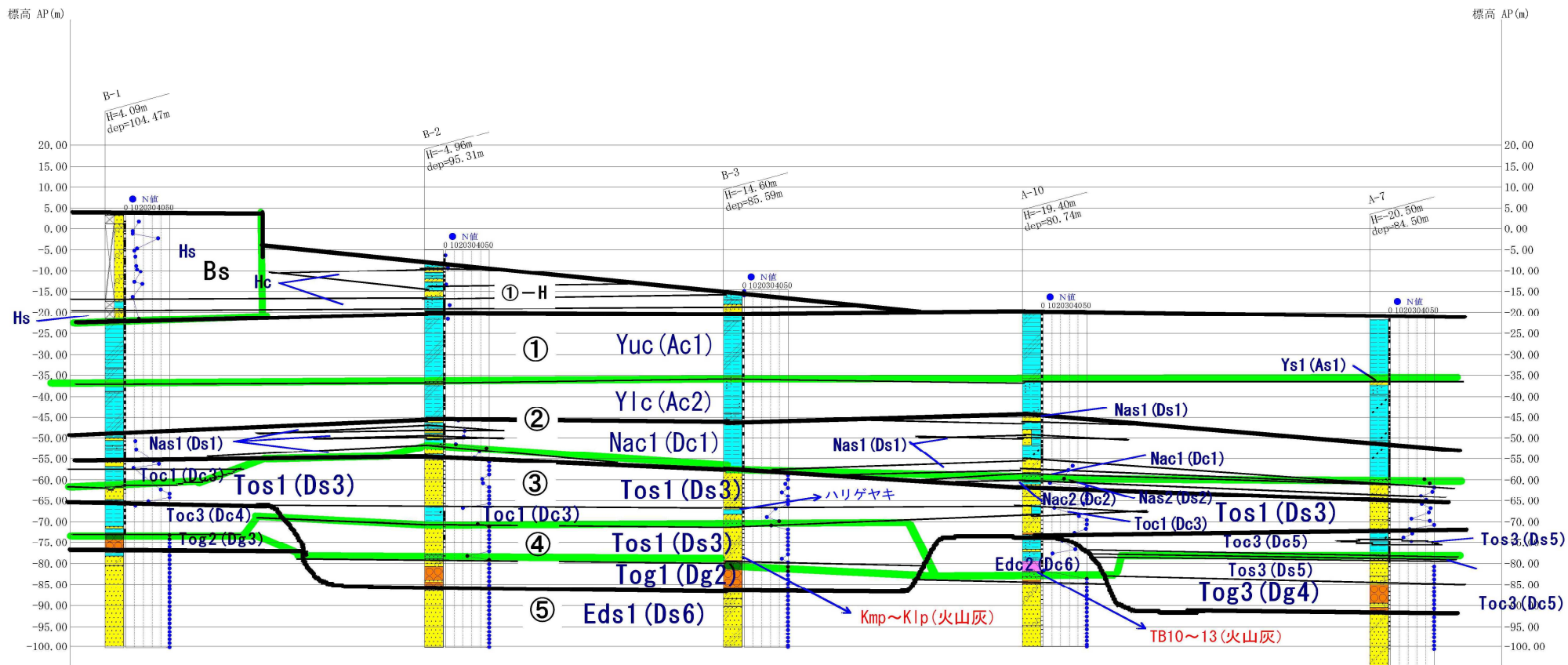


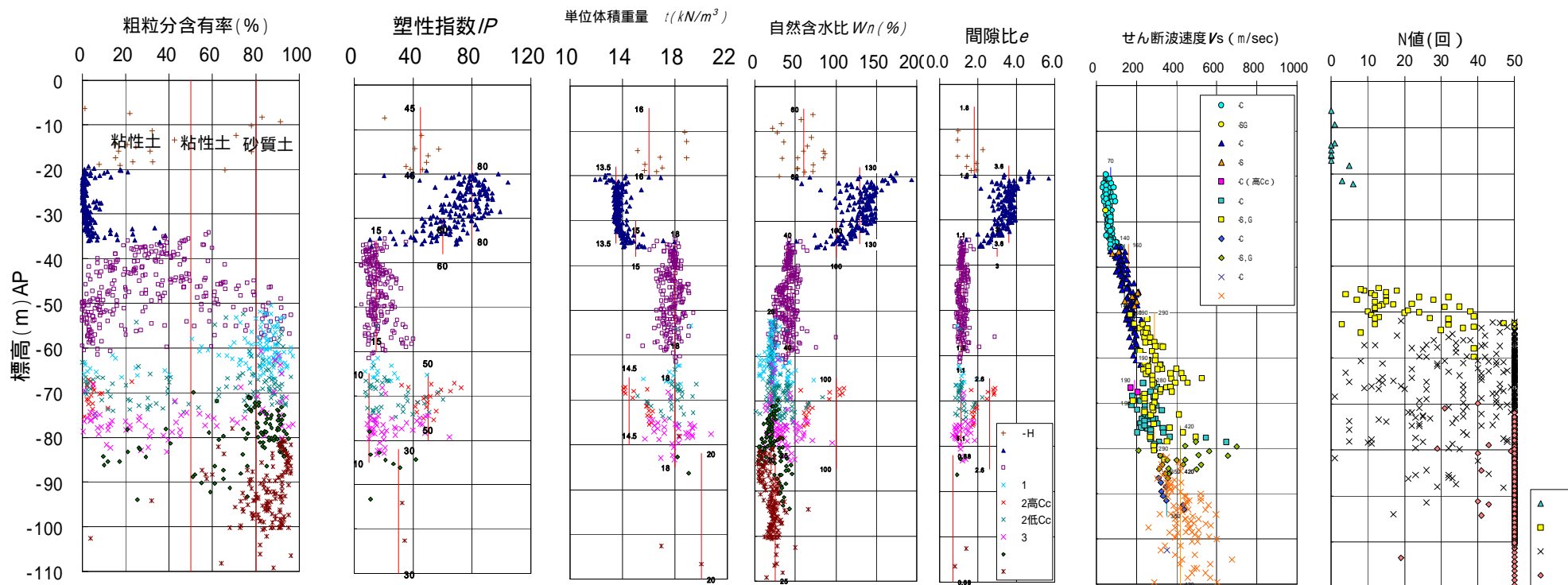
図 - 5.2 理学情報と工学情報によるD滑走路島の地層断面図(山側 測線)



Yuc: 有楽町上部粘性土層	Ylc: 有楽町下部粘性土層	Ys1: 有楽町上部砂質土層	Ys2: 有楽町下部砂質土層
Nac ₍₁₋₂₎ : 七号地層粘性土層1~2	Nac ₍₁₋₂₎ : 七号地層砂質土層1~2	btg: 埋没段丘礫層	
Toc1: 東京層上部粘性土層	Toc2: 東京層下部粘性土層	Tog1: 東京層上部層基底礫層	Tog2: 東京礫層
Edc1: 江戸川層粘性土層	Edc1: 江戸川層砂質土層		

~ : 工学境界による区分層名 (緑線: 工学境界)
 (赤字の地層名は理学情報の検討により対比された大磯丘陵の地層名)

図 - 5.3 理学情報と工学情報による既設空港島 ~ 連絡誘導路部の地層断面図



工学区分名	工学区分層の特徴
第層	粘性土地盤、強度増加率が一定で、高含水比を有する。シンウォールサンプリングは可能である。
第層	互層地盤、物性が大きくばらついている。砂質土は比較的大きな N 値の箇所も存在する。
第層	小規模構造物の支持層となりうる層、互層地盤、N 値 50 程度が認められ、下に厚さ数 m の粘性土がある。
第層	中規模～大規模構造物の支持層となりうる層、N 値 50 以上の連続した層で、一部粘性土が挟在している。
第層	大規模構造物の支持層となりうる層、N 値 50 以上の連続した層である。

図 - 5.4 N 値, せん断波速度, 物理特性の標高分布と工学区分層の特徴

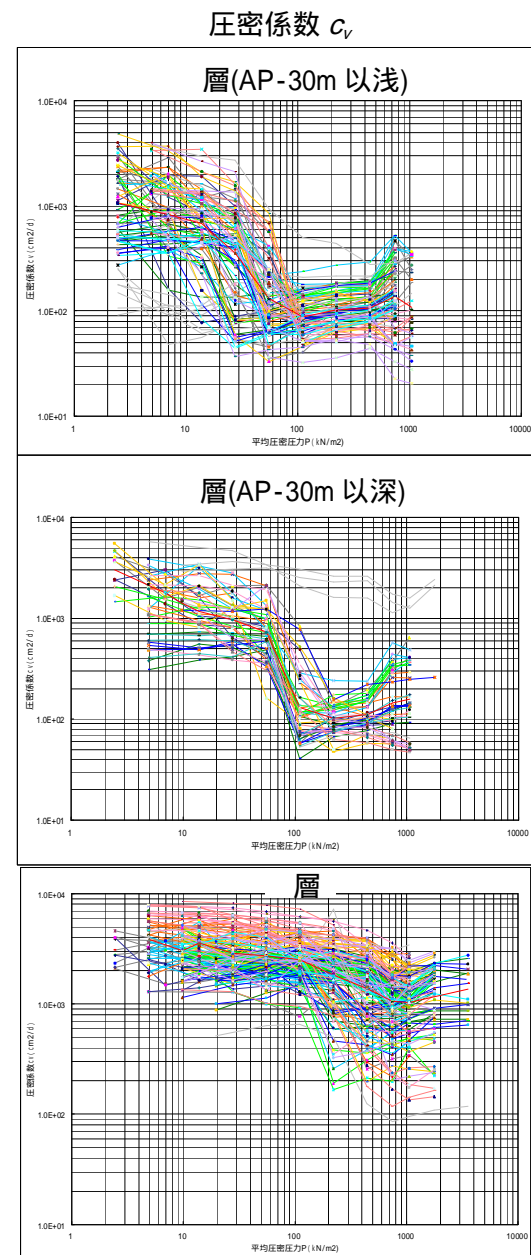
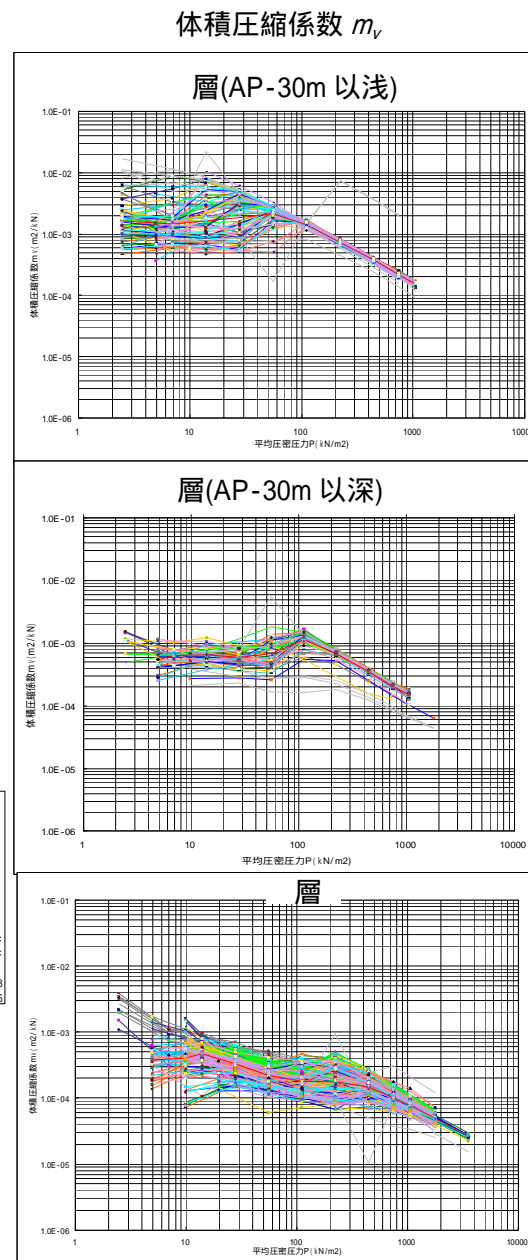
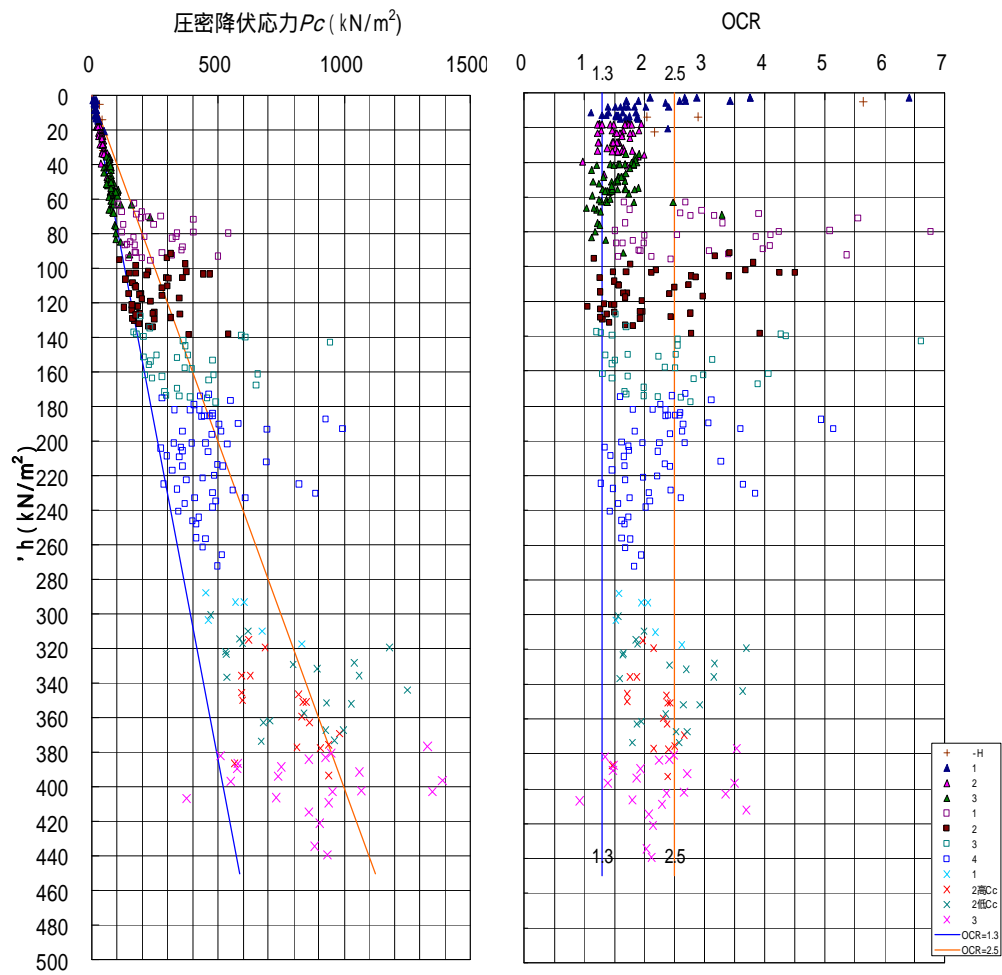


図 - 5.5 圧密降伏応力 P_c 及び過圧密比 OCR と有効土被応力 σ'_v の関係、層の体積圧縮係数 m_v , 圧密係数 c_v

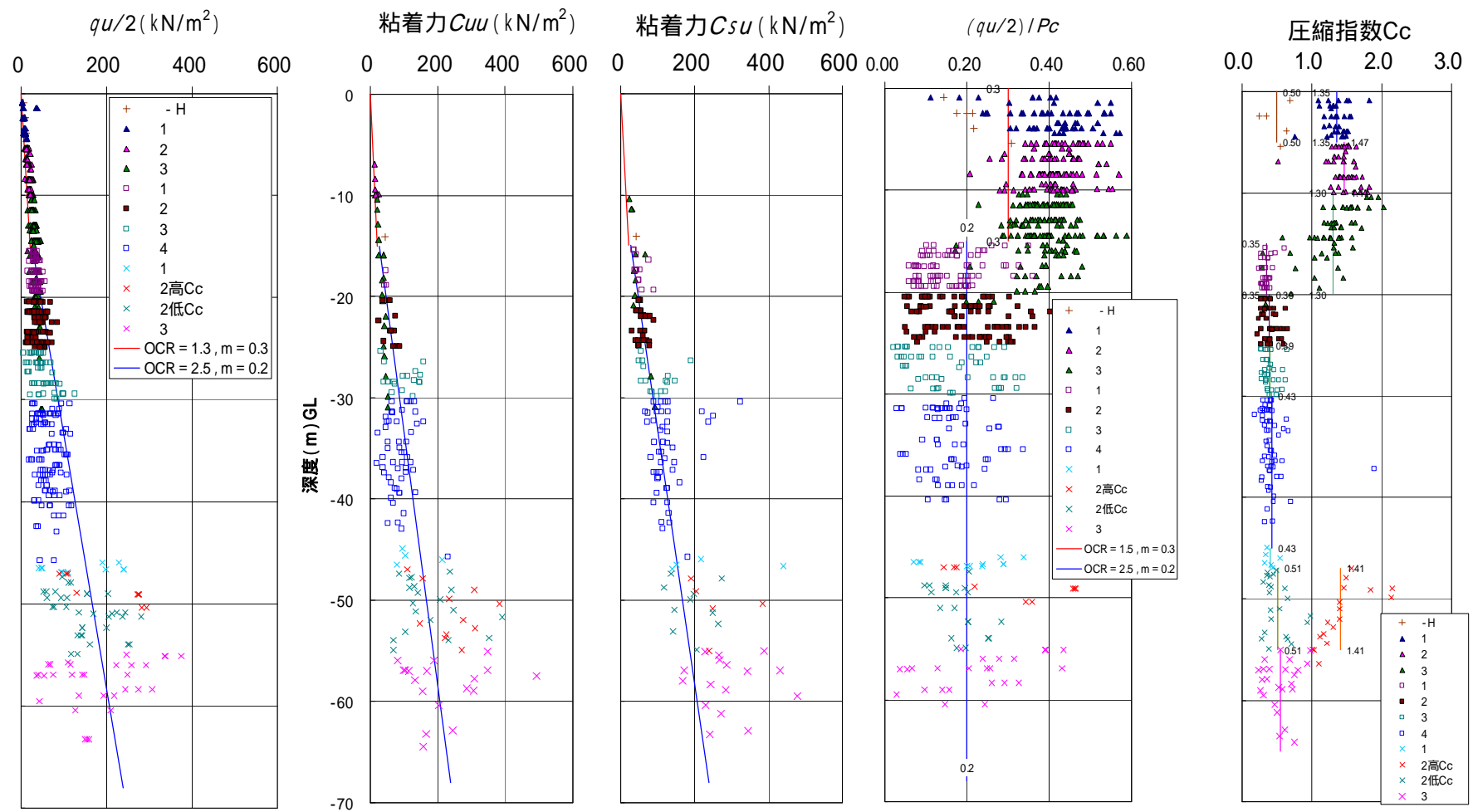
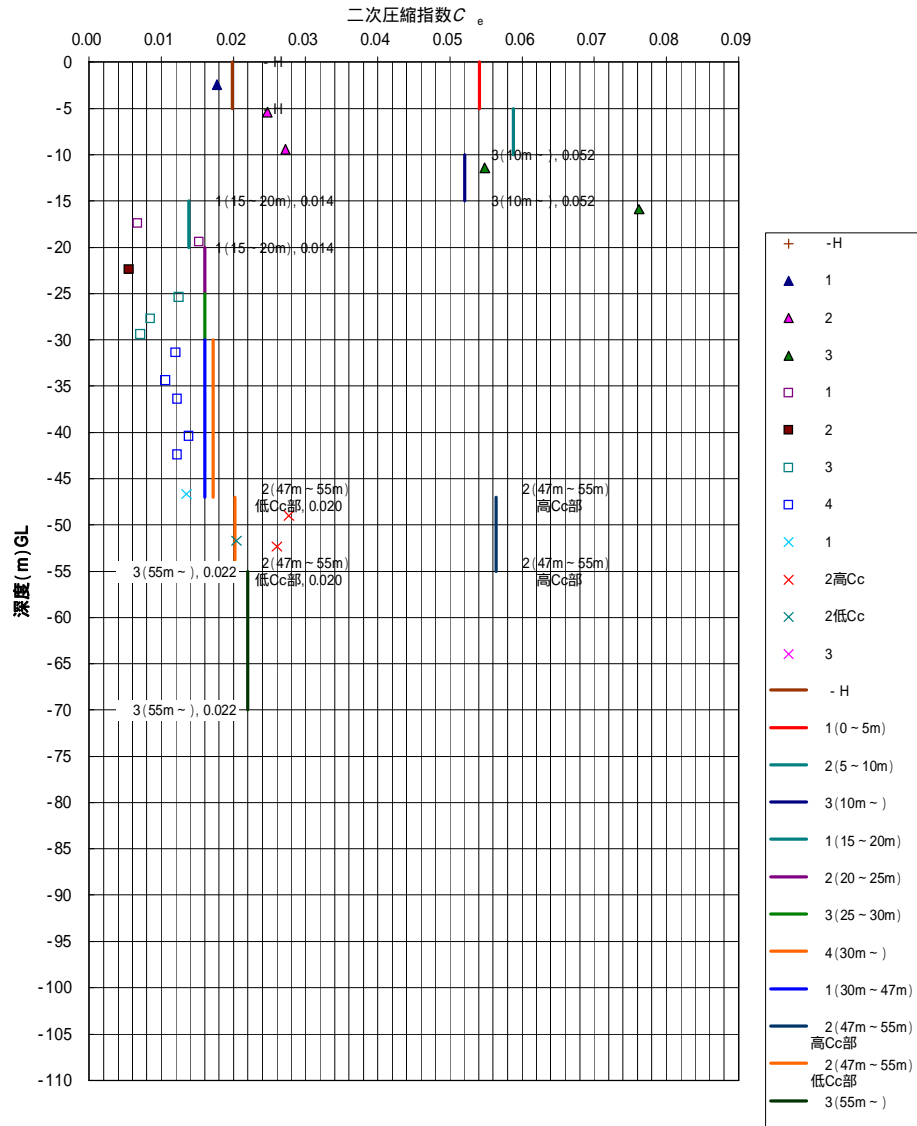


図 - 5.6 セン断強度 (C_{uu} : 三軸 UU 試験、 C_{su} : 簡易 CU 試験、 $qu/2$: 一軸圧縮試験) 及び圧縮指数 C_c の深度分布



C_c より求めた C $C_e = 0.04C_c$

	各試験で 求められ ている C_c の平均	C_e
-H	0.50	0.020
1(0~5m)	1.35	0.054
2(5~10m)	1.47	0.059
3(10m~)	1.30	0.052
1(15~20m)	0.35	0.014
2(20~25m)	0.39	0.016
3(25~30m)	0.40	0.016
4(30m~)	0.43	0.017
1(30m~47m)	0.40	0.016
2(47m~55m) 高Cc部	1.41	0.056
2(47m~55m) 低Cc部	0.51	0.020
3(55m~)	0.55	0.022

図 - 5.7 2次圧縮指数 C の深度分布